



高信頼ミリ波帯 WBAN の研究

| | |
|--------|---|
| 著者 | 秋元 浩平 |
| 号 | 63 |
| 学位授与機関 | Tohoku University |
| 学位授与番号 | 工博第5594号 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/00127592 |

| | |
|------------|---|
| 氏名 | あきもと こうへい |
| 授与学位 | 秋元 浩平 |
| 学位授与年月日 | 博士 (工学) |
| 学位授与の根拠法規 | 平成 31 年 3 月 27 日 |
| 研究科, 専攻の名称 | 学位規則第 4 条第 1 項 |
| 学位論文題目 | 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 通信工学専攻 |
| 指導教員 | 高信頼ミリ波帯 WBAN の研究 |
| 論文審査委員 | 指 導 教 員 東北大学教授 末松 憲治 |
| | 論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 末松 憲治 東北大学教授 加藤 寧 |
| | 東北大学教授 陳 強 |

論文内容要旨

人体の生体情報を収集する WBAN (wireless body area network) はウェアラブルあるいはインプラント型のセンサノードによる人体領域通信である. 各 WBAN ノードは WBAN ユーザの生体情報をセンシングし, 遠隔医療や在宅医療, セルフケアによる生活習慣病の予防などに活用される. WBAN により通院や入院の頻度を抑えることができ, 地方での医師不足の問題や医療費負担の低減, および健康寿命の延伸に対して有効である. 本論文は, 駅前や大通りなどの WBAN ユーザが密集する環境下において, WBAN 間干渉に強く, また足先マルチホップ通信による高信頼な通信が可能なミリ波帯 (60 GHz 帯) を用いた WBAN の提案と, その設計評価および実験的検証に関する研究をまとめたものであり, 全編 5 章よりなる.

第 1 章では, WBAN で課題となる WBAN 間干渉の説明と, 従来のマイクロ波帯に比べ人体のブロッキング減衰による WBAN 間干渉抑制効果が高いミリ波帯を用いた WBAN の提案, およびマイクロ波帯に比べて見通し外通信が不安定となりやすいミリ波帯での通信の高信頼性を目指して, 足先マルチホップ通信を提案している. IoT 技術が成熟しつつある昨今, コアネットワークの高性能化に伴い大量のノード (モノ) から環境データを収集しネットワーク側でのビッグデータ解析が一般的となる Massive Connect IoT 時代へ変化すると考えられている. Massive Connect IoT では WBAN ユーザ密集および歩行時のような動的環境が想定され, WBAN 間干渉が課題となる. また WBAN ノード数が増加し, 体表のさまざまな位置にあるノード同士の通信の実現が求められる. ここで従来の WBAN は 400 MHz 帯, 800 MHz 帯, 900 MHz 帯, および 2.4 GHz 帯などのマイクロ波帯の使用を規定している. 図 1 にマイクロ波帯 WBAN における人体遮蔽による不感帯を示す. 人体の中心から 0.5 m 離れた点から伝搬してくる電波が自由空間伝搬に比べて 10 dB 以上減衰する領域を灰色で示している. マイクロ波帯は人体幅に対して波長が十分短くないため回折により電波が回り込み, 遠くのユーザまで干渉が届く. したがって従来のマイクロ波帯 WBAN では WBAN 間干渉が深刻化する. そこで本論文では WBAN 間干渉に強いミリ波帯 (60 GHz 帯) を用いた WBAN を提案する. 図 2 に 60 GHz 帯 WBAN における人体遮蔽による不感

帯を示す。人体の中心から 0.5 m 離れた点から伝搬してくる電波が自由空間伝搬に比べて 10 dB 以上減衰する領域を灰色、20 dB 以上減衰する領域を濃い灰色で示している。このように 60 GHz 帯における人体のブロッキングによる不感帯の領域が広く干渉電波は人体により遮られやすい。

一方、WBAN 内通信は体表上のノード同士の通信のため伝搬路が体表に極めて近く、所望の

WBAN 内通信も大きな人体ブロッキングの影響を受ける。本論文では、図 1.7 に示す足先ノードを中継局としたマルチホップ伝送を行う 60 GHz 帯 WBAN を提案する。一般に WBAN 内通信の伝搬路は人体表面に近接しており、60 GHz 帯では従来のマイクロ波に比べて通信が不安定になりやすい。

一方で医療用途などの WBAN アプリケーションの実現のためには通信の高信頼性が必要である。本論文で提案する足先マルチホップ通信では、体表上のノード同士の直接通信に代わり、足先ノードを中継局とする通信を行う。足先ノードは体表に対してアンテナ高を稼ぐことができるため、体表ノード（足先ノード間の伝搬路が人体表面から離れ、人体の影響

を抑えることが可能である。したがって、一見すると直接通信よりも延べ伝搬距離が長くなる足先マルチホップ通信のほうが高信頼な通信が可能となる。また典型的な混雑環境である歩行時には足先ノードがさらに前方に出されるため、より見通しに近い伝搬路を確保可能である。

第 2 章では、WBAN 間干渉電力の減衰要因である人体のブロッキング特性を 60 GHz 帯において実測し、このブロッキング測定結果をモデル化した計算機シミュレーションによる WBAN 間干渉特性を評価している。WBAN 間干渉波は干渉を受けるユーザ（被干渉ユーザ）および干渉を与えるユーザ（与干渉ユーザ）自身による人体ブロッキングと、被干渉ユーザと与干渉ユーザ間に存在する第 3 者の伝搬路上ユーザによる人体ブロッキングが存在する。実測の結果、被干渉ユーザと与干渉ユーザにより、人体正面に装着する WBAN ノードに対しその後方 120° 以上の角度から到来する干渉波はその人体により遮蔽されること、伝搬路上ユーザによりブロッ

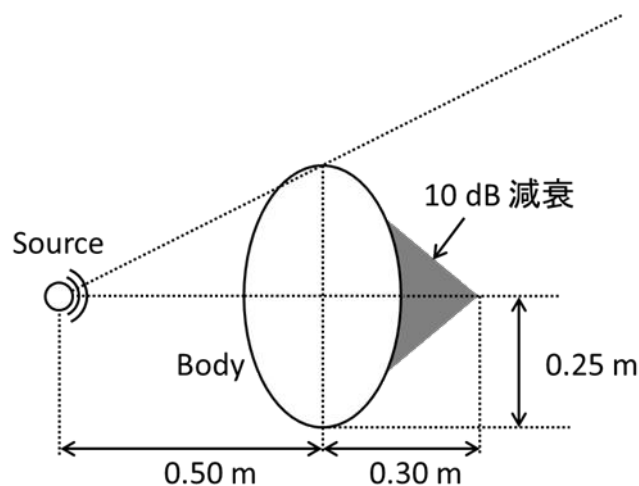


図 1. マイクロ波帯 WBAN における人体遮蔽による不感帯

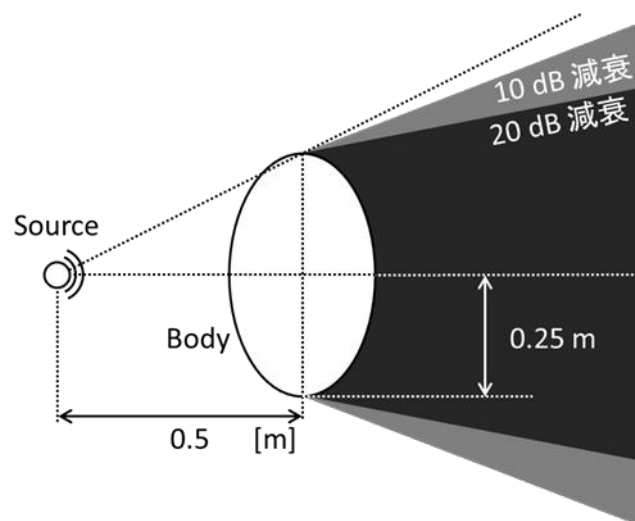


図 2. ミリ波帯 WBAN における人体遮蔽による不感帯

キングにより，干渉波が遮蔽される人体幅は約 0.4 m であることを示した。

さらにこのブロッキング測定結果をモデル化した計算機シミュレーションの結果を図 3 に示す。WBAN のユーザ密集環境における一人当たりの平均干渉局数は，従来のマイクロ波帯 WBAN ではユーザ密度に従い平均干渉局数が線形に増加する一方，ミリ波帯 WBAN ではユーザ密度が高くなっても平均干渉局数が約 7 局に収束することを明らかにした。以上より，提案するミリ波帯 WBAN がユーザ密集環境下において WBAN 間干渉に強く，従来のマイクロ波帯 WBAN に比べて高信頼な通信が可能であることが示された。

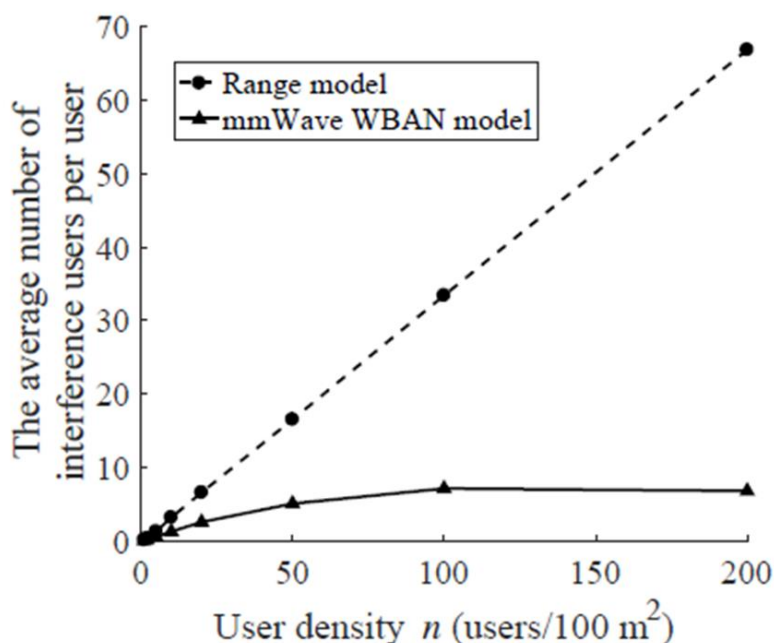


図 3. WBAN ユーザ 1 人あたりの平均干渉局数

3 章では，60 GHz 帯 WBAN 内直接通信における人体の大きな減衰を課題とし，人体の減衰の影響を受けにくい足先マルチホップ通信の有効性を示すため，可視光による歩行時の足先からの伝搬特性の分類化を用いた 60 GHz 帯 WBAN 内伝搬実験を行い，足先マルチホップ伝搬路の減衰量を明らかにする。歩行時は，提案する足先マルチホップ通信の伝搬路が変動する代表的な動的環境である。歩行の 1 サイクル内においても足先ノードと体表上のノードの相対位置関係が常に変動する。一方，実際に動いている状態でのミリ波帯での連続的な測定が難しいことから，歩行時の姿勢パターンを分析し，典型的な姿勢を抽出し測定を行う。そのために，ミリ波帯と同様に直進性の強く実際に動いている状態でも連続的な測定が可能な可視光を用いてミリ波帯の歩行時の足先ノードからの伝搬環境を推察し，実測に必要な人体の姿勢を決定する。図 4 に可視光を用いた歩行時の伝搬特性の分類結果を示す。測定の結果，歩行時において足先から体表までの伝搬特性が Front-toe, Center-toe, および Back-toe の 3 種類の状態に分類されることを示し，それぞれの時間率が 26%，43%，および 31%であることを求め

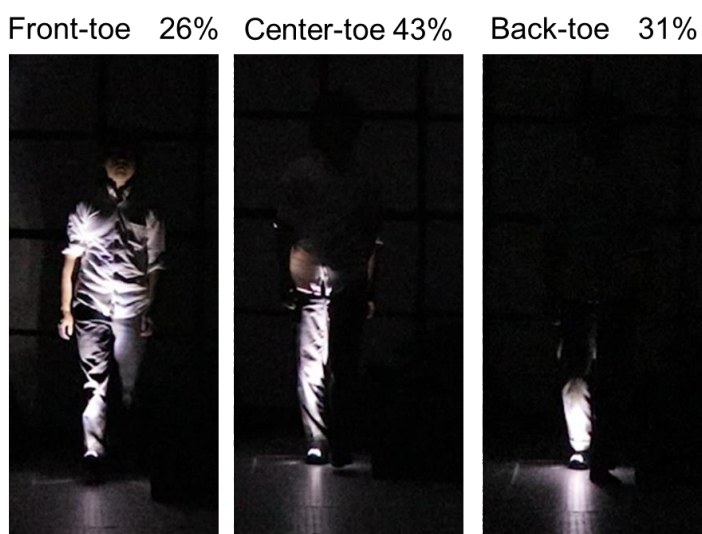


図 4. 可視光による足先からの伝搬特性の分類

た. 次いで, この3状態において, 60 GHz帯の信号を用いて, 足先から, センサノードやハブノードが装着されるであろう複数の体表上の点までの減衰量を実測した. 図5に測定結果を示す. この結果, マイクロ波帯 WBAN で行われているノード間直接通信に比べて, 足先マルチホップ通信は, その通信路の人体による減衰が小さいことを実証した.

4章では足先マルチホップを用いた 60 GHz 帯 WBAN システムの信頼性が不明であることを課題とし, 足先マルチホップを用いた 60 GHz 帯 WBAN の回線設計および通信路容量の評価により提案システムが高信頼であることを示す. 第3章で得られた歩行時における3種類の状態の時間率と各ノード間の 60 GHz 帯での減衰量をモデル化し, 体表上の腹部側の任意の位置の送受信点に対し, 足先マルチホップ通信の通信路容量をモンテカルロ法により評価した. 図5に従来の直接通信と提案する足先マルチホップ通信の通信路容量のシミュレーション結果を示す. 従来手法は体表上

のノード間の通信距離が離れすぎている場合は通信ができないため, およそ 70% の通信のスループットが 1 Mbit/s 以下となっている. これに対し提案手法は 99.6% 以上の通信のスループットが 10 Mbit/s 以上となっていることから, 体表上の任意のノード間での通信が可能であり, 信頼性の高い通信が実現可能である.

第5章は結論である.

以上要するに本論文は, WBAN 間干渉を人体ブロッキングにより低減できるミリ波帯 WBAN を提案し, その干渉の抑制効果を実証するとともに, ミリ波で問題となる WBAN 内通信の不安定性を足先マルチホップ方式により解決できることを実証することで, ユーザ密集環境下においても高信頼なミリ波帯 WBAN の実現性を示したものである.

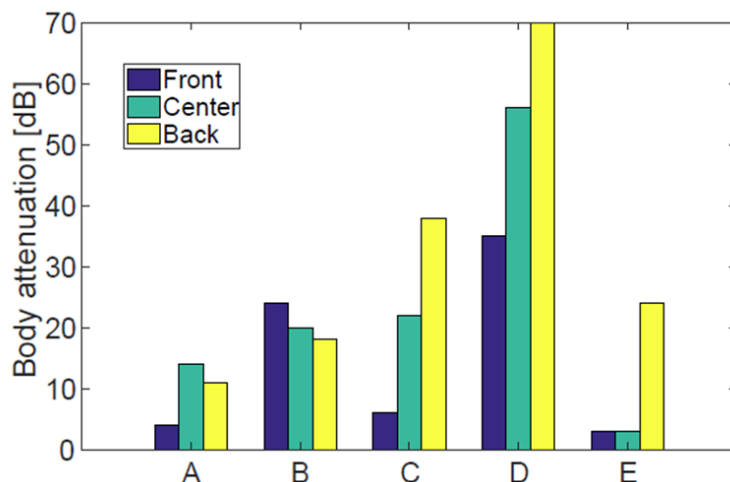


図4. 足先マルチホップ用 WBAN 内伝搬の人体による減衰量

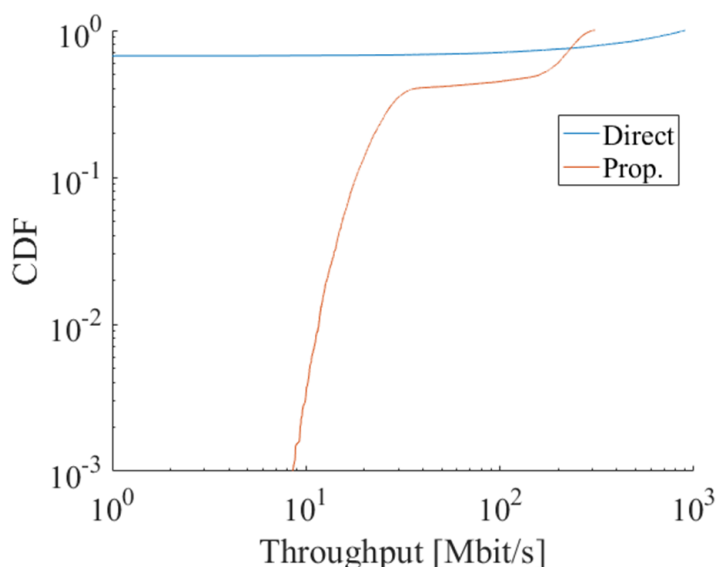


図5. 直接通信 (従来) と足先マルチホップ通信 (提案) の WBAN 内通信路容量 CDF (cumulative distribution function)

論文審査結果の要旨

人体の生体情報を収集する WBAN (wireless body area network) は体表上のセンサノードおよびハブノードを用いた個人の人体領域における無線通信ネットワークの 1 つであり、主に遠隔・在宅医療やセルフケアによる生活習慣病の予防に用いられ、医師不足や医療費削減および健康寿命の延伸に対し重要である。本論文は、駅前や大通りなどの WBAN ユーザが密集する環境下において、WBAN 間干渉に強く、また足先マルチホップ通信による高信頼な通信が可能なミリ波帯 (60 GHz 帯) を用いた WBAN の提案と、その設計評価および実験的検証に関する研究をまとめたものであり、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、従来のマイクロ波帯に比べ人体のブロッキング減衰による WBAN 間干渉抑制効果が高いミリ波帯を用いた WBAN を提案している。WBAN 間干渉電力の減衰要因である人体のブロッキング特性を 60 GHz 帯において実測し、干渉波の経路上に存在する第 3 者の人体により干渉波が遮蔽される幅は約 0.4 m であること、人体正面に装着する WBAN ノードに対しその後方 120° 以上の角度から到来する干渉波はその人体により遮蔽されることを示した。さらにこのブロッキング測定結果をモデル化した計算機シミュレーションにより、WBAN のユーザ密集環境における一人当たりの平均干渉局数を評価し、従来のマイクロ波帯 WBAN ではユーザ密度に従い平均干渉局数が線形に増加する一方、ミリ波帯 WBAN ではユーザ密度が高くなっても平均干渉局数が約 7 局に収束することを明らかにした。この成果は、提案するミリ波帯 WBAN がユーザ密集環境下において WBAN 間干渉に強く、従来のマイクロ波帯 WBAN に比べて高信頼な通信が可能であることを示した点で、極めて重要な知見である。

第 3 章では、マイクロ波に比べて見通し外通信が不安定となりやすいミリ波での通信の高信頼性を目指して、足先マルチホップ通信を提案している。簡易的に光源を用いた測定により、歩行時において足先から体表までの伝搬特性が 3 種類の状態に分類されることを示し、それぞれの時間率を測定した。次いで、この 3 状態において、60 GHz 帯の信号を用いて、足先から、センサノードやハブノードが装着されるであろう複数の体表上の点までの減衰量を実測した。その結果、マイクロ波帯 WBAN で行われているノード間直接通信に比べて、足先マルチホップ通信は、その通信路の人体による減衰が小さいことを実証した。この成果は、ミリ波帯 WBAN における足先マルチホップの有効性を示したものであり、先駆的な研究成果として高く評価される。

第 4 章では、足先マルチホップ通信の信頼性を計算機シミュレーションにより評価している。第 3 章で得られた歩行時における 3 種類の状態の時間率と各ノード間の 60 GHz 帯での減衰量をモデル化し、体表上の腹部側の任意の位置の送受信点に対し、足先マルチホップ通信の通信路容量をモンテカルロ法により評価した。その結果、99.6%の確率で 10 Mbit/s 以上の通信が可能であることを示した。この成果は、ミリ波帯で高信頼な通信が可能な WBAN を実現する上で極めて有用な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、WBAN 間干渉を人体ブロッキングにより低減できるミリ波帯 WBAN を提案し、その干渉の抑制効果を実証するとともに、ミリ波で問題となる WBAN 内通信の不安定性を足先マルチホップ方式により解決できることを実証することで、ユーザ密集環境下においても高信頼なミリ波帯 WBAN の実現性を示したものであり、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。